

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.01.016

四驱电动汽车再生制动力控制策略研究*

谢博臻¹, 朱绍鹏^{1*}, 李俊杰¹, 刘震涛¹, 宁晓斌²

(1. 浙江大学 动力机械及车辆工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:为提高四驱电动汽车制动能量回收效率,在分析再生制动系统的机械结构和约束条件下,制定了基于并联再生制动系统的固定比例分配策略和基于串联再生制动系统的理想制动力分配策略,定义了相关的再生制动力修正系数。在 Simulink/Stateflow 中建立了两种制动力分配策略及包括四驱车辆、电机、电池等的再生制动系统模型,通过不同车速、不同制动强度下的仿真分析,验证了两种制动控制策略的制动效果。仿真结果表明:采用合理的分配策略、改善电池的充电能力,可以提高四驱电动汽车的制动能量回收效率;两种制动控制策略均能很好地完成制动任务,且在制动能量回收效率方面,理想制动力分配策略要优于固定比例分配策略。

关键词:轮毂电机;四驱电动汽车;再生制动系统;制动力分配;建模仿真

中图分类号:TP273+.5;U469.72

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)01-0083-06

Control strategy on regenerative braking force of four-wheel-drive electric vehicle

XIE Bo-zhen¹, ZHU Shao-peng¹, LI Jun-jie¹, LIU Zhen-tao¹, NING Xiao-bin²

(1. Power Machinery and Vehicular Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of four-wheel-drive electric vehicle braking energy recovery, in the analysis of the mechanical structure and the restraint condition of the regenerative braking system, a fixed proportion allocation strategy based on the parallel regenerative braking system and an ideal braking force distribution strategy based on the series regenerative braking system was established, the relevant regenerative braking coefficient was defined. Two kinds of braking force distribution strategy and the model of regenerative braking system including four-wheel-drive vehicle, motor and battery in Simulink/Stateflow were established. The braking effect of the two kinds of braking control strategy through the simulation analysis of different speed and different braking intensity was verified. The simulation results indicate that using the reasonable force distribution strategy and improve the battery charging capacity can improve the energy recovery efficiency of the four-wheel-drive electric vehicle. These two kinds of brake control strategy can accomplish the task in braking very well, and in terms of braking energy recovery efficiency, the ideal braking force distribution strategy is better than the fixed rate allocation strategy.

Key words: in-wheel-motor; four-wheel-drive electric vehicle; regenerative braking system; braking force distribution; modeling and simulation

0 引言

电池技术距离高能量密度、低价格的要求还有很

大的距离^[1-4]。单次充电续航里程不足是制约电动汽车进一步发展的主要难题。采用轮毂电机的四驱电动汽车,在驱动和制动能量回收时均可减少能量损耗。制动能量通常在整车驱动总能量中占有较大的比例,

收稿日期:2017-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375452);浙江省重大科技专项基金资助项目(2013C01001);浙江省电动汽车科技创新团队资助项目(2011R50008-23)

作者简介:谢博臻(1991-),男,浙江慈溪人,硕士研究生,主要从事新能源车制动能量回收研究。E-mail: xiebozhen@zju.edu.cn

通信联系人:朱绍鹏,女,副教授,硕士生导师。E-mail: spzhu@zju.edu.cn

在加速、制动和停车频繁的城市道路工况下,这一比例甚至高达 50%,采用合理的制动能量回收策略可以增加整车 20% ~ 30% 续驶里程^[5]。

GAO Yi-ming 等^[6]针对前轮电机驱动车辆 3 种不同的制动要求,提出了相应的制动力分配策略,并且通过城市行驶循环工况的仿真分析,验证了控制策略的有效性。此后该团队又提出了一种与 ABS 系统相结合的再生制动控制策略^[7],研究了如何在保证制动安全性能的前提下得到最大制动能量回收效率;GAO Hong-wei 等^[8]提出了基于开关磁阻电机的再生制动神经网络控制系统,并以某款混合动力汽车为研究对象进行了仿真分析,结果表明该控制系统显著提高了制动力矩的响应精度以及再生制动的能量回收效率;PANAGIOTIDIS^[9]以某款并联式混合动力汽车为研究对象,详细分析了各项再生制动能量回收的约束条件;HSIAO M H 等^[10]根据变结构控制设计了一种再生制动控制策略,得到了较高的再生制动能量回收效率;HOON Y 等^[11]设计了一种针对 CVT 系统的再生制动力控制策略,大幅提高了再生制动的能量回收效率。

本研究建立固定比例制动力分配及理想制动力分配两种控制策略,通过仿真分析,验证比较两种制动控制策略的制动效果及能量回收效率。

1 四驱电动汽车再生制动系统

1.1 机械结构特点

采用轮毂电机的四驱电动汽车可以独立控制 4 个轮毂电机,从而在前、后车轴上都可以引入电机再生制动力,再生制动系统的结构简图如图 1 所示。

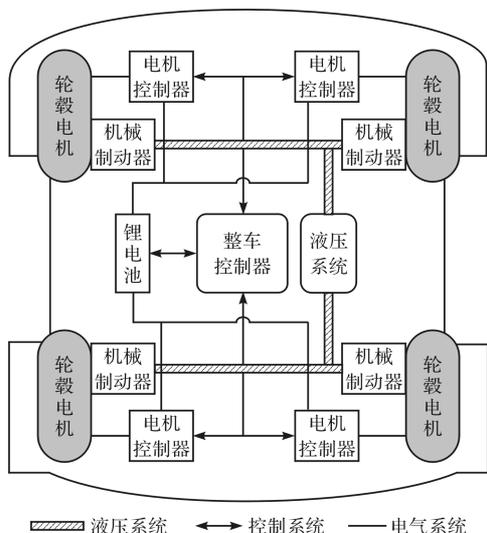


图 1 再生制动系统的结构简图

1.2 制动力分配约束条件

(1) 轮毂电机特性影响。本文所选用的永磁无刷直流轮毂电机的最大再生制动力矩是随着转速的不同而变化的,因此需要在制动过程中不断检测轮毂电机的运行状态,尤其是转速信号;

(2) 电池工作状态约束。4 个轮毂电机再生制动的总发电功率不能超过电池当前工作状态下所允许的最大充电功率,因此应该根据电池的最大充电功率对电机的最大再生制动力矩进行限制,4 个轮毂电机再生制动时总的发电功率不应该超过电池的最大充电电压和最大充电电流所限制的最大充电功率。

充电时的等效电路图如图 2 所示^[12]。

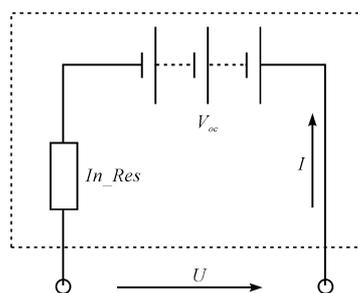


图 2 充电等效电路图

U —充电电压; I —充电电流; In_Res —锂离子电池的内阻; V_{oc} —锂离子电池的开路电压

由基尔霍夫电压定理可得:

$$U = V_{oc} + I \times In_Res \tag{1}$$

电池的充电功率 P_b 为:

$$P_b = U \times I \tag{2}$$

由式(1 ~ 2)可得锂离子最大充电电压 U_{max} 限制下的最大充电功率为:

$$P_{bat_max_U} = U_{max} \times I = U_{max} \left(\frac{U_{max} - V_{oc}}{In_Res} \right) \tag{3}$$

锂离子最大充电电流 I_{max} 限制下的最大充电功率为:

$$P_{bat_max_I} = I_{max} \times U = I_{max} (V_{oc} + I_{max} \times In_Res) \tag{4}$$

由式(3 ~ 4)可得电池的最大充电功率为:

$$P_{bat_max} = \min(P_{bat_max_U}, P_{bat_max_I}) \tag{5}$$

由 P_{bat_max} 所限制的 4 个轮毂电机在制动时的再生制动力矩之和的最大值 T_{bat_max} 为:

$$T_{bat_max} = \frac{9\ 550 P_{bat_max}}{n} \tag{6}$$

式中: n —电机的转速, r/min 。

假设单个轮毂电机所限制的最大再生制动力矩为 T_{motor_max} ,则 4 个轮毂电机再生制动力矩之和的最大值 T_{max} 为:

$$T_{\max} = \min(4 \times T_{\text{motor_max}}, T_{\text{bat_max}}) \quad (7)$$

另外,当电池的 SOC 值过高时,为了保证电池的使用寿命,不能再继续向电池充电,即此时不能再进行制动能量的回收。

(3) 紧急制动工况限制

紧急制动时要求短时间迅速将车停住,并保证制动时的方向稳定性。本文将制动强度 $n > 0.7$ 时定为紧急制动工况。此时,不再采用电机再生制动力,只采用机械制动。

此外,不考虑车轮打滑,制动力 F 与制动力矩 T 的关系为:

$$T = F \times r \quad (8)$$

式中: r — 车轮半径。

2 再生制动控制策略设计

2.1 固定比例分配策略

传统的并联再生制动系统实施方便,但制动能量回收效率低,驾驶员的制动感觉差^[13]。本文提出一种基于并联再生制动系统的按固定比例分配制动力的控制策略,即同时调整 4 个电机的再生制动力和整车的机械制动力,以保证整车前后轴总的制动力分配沿着 β 线分布。同时,保持前后轴的机械制动力的比例不变,保证前后轴的再生制动力的比例和机械制动力的比例相同。另外,分配到前、后轴的再生制动力平均分配到左、右车轮的两个轮毂电机。

综上所述,制动力的分配应该满足:

$$\begin{cases} F_{\mu 1} + F_{\mu 2} = zG \\ F_{\mu 1_ren} + F_{\mu 1_fric} = F_{\mu 1} \\ F_{\mu 2_ren} + F_{\mu 2_fric} = F_{\mu 2} \\ \frac{F_{\mu 1_ren}}{F_{\mu 2_ren}} = \frac{F_{\mu 1_fric}}{F_{\mu 2_fric}} = \frac{F_{\mu 1}}{F_{\mu 2}} = \beta \\ F_{\mu 1_ren_r} = F_{\mu 1_ren_l} = \frac{1}{2}F_{\mu 1_ren} \\ F_{\mu 2_ren_r} = F_{\mu 2_ren_l} = \frac{1}{2}F_{\mu 2_ren} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $F_{\mu 1}, F_{\mu 2}$ — 前、后轴总制动力; $F_{\mu 1_ren}, F_{\mu 2_ren}$ — 前、后轴的电机再生制动力; $F_{\mu 1_fric}, F_{\mu 2_fric}$ — 前、后轴的机械制动力; $F_{\mu 1_ren_r}, F_{\mu 1_ren_l}$ — 前轴左、右轮毂电机的再生制动力; $F_{\mu 2_ren_r}, F_{\mu 2_ren_l}$ — 后轴左、右轮毂电机的再生制动力; z — 制动强度; G — 整车重力。

按固定比例分配制动力时,若前轮两个轮毂电机总的最大再生制动力满足前轴所需要的总制动力时,前轴只有再生制动力参与制动;反之,则前轴的再生制

动力为电机所能产生的最大再生制动力,剩余所需的制动力由机械制动力补充。后轴所需要的再生制动力根据前轴再生制动力大小进行计算,即满足 β 线分布。同样的,若后轴所分配的再生制动力不能满足制动需求,则剩余所需要的制动力由机械制动力补充。在紧急制动工况下,即当制动强度 $z > 0.7$ 时,为了保证制动安全,电机再生制动力不再参与制动,由机械制动系统来完成整车制动。

为了更好地表现不同制动强度下再生制动与机械制动不同状态转换,笔者采用 Simulink/Stateflow 设计固定比例制动力分配策略,如图 3 所示。

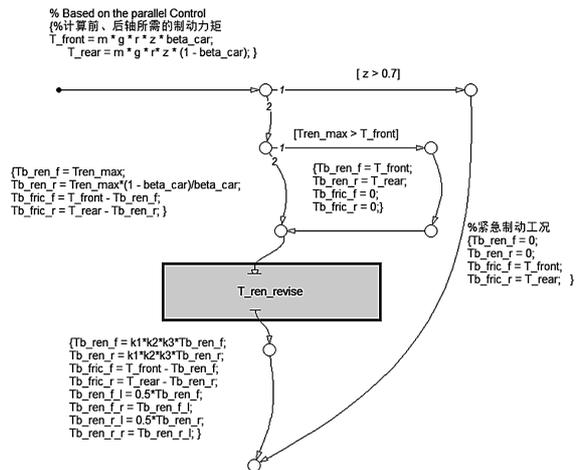


图 3 固定比例分配策略

2.2 理想制动力分配策略

当前后轴的再生制动力沿着图 3 中 I 曲线分配时,车轮对地面附着条件的利用最佳,制动时汽车的稳定性也较好,且前后轴再生制动力不需要受到 β 线分布的限制,能够更充分地发挥电机再生制动能量回收的潜力。因此本文提出一种基于串联再生制动系统的理想制动力分配策略,即保证前后轴总的制动力沿着 I 曲线分布,同时尽可能的利用电机再生制动力。理想制动力分配应该满足:

$$\begin{cases} F_{\mu 1} = F_{\mu 1_ren} + F_{\mu 1_fric} = \frac{zG(b + zh_g)}{L} \\ F_{\mu 2} = F_{\mu 2_ren} + F_{\mu 2_fric} = \frac{zG(a - zh_g)}{L} \\ F_{\mu 1_ren_r} = F_{\mu 1_ren_l} = \frac{1}{2}F_{\mu 1_ren} \\ F_{\mu 2_ren_r} = F_{\mu 2_ren_l} = \frac{1}{2}F_{\mu 2_ren} \end{cases} \quad (10)$$

式中: a — 前轴到质心的距离; b — 后轴到质心的距离; h_g — 质心高度; L — 轴距。

理想制动力分配策略如图 4 所示。

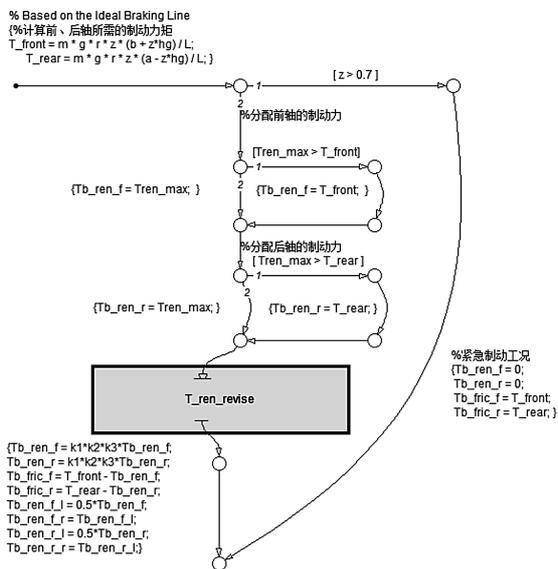


图 4 理想制动力分配策略

该策略首先根据理想制动力曲线确定前、后轴所需的总制动力,然后再分别对前、后轴的电机制动力和机械制动力进行分配。对于前轴,当前轴两个轮毂电机的最大再生制动力满足前轴所需要总制动力时,则前轴只有电机再生制动力参与制动;反之,前轴的再生制动力为前轮两个轮毂电机的最大再生制动力,不足部分由机械制动力进行补充。同样的,对于后轴,当后轴两个轮毂电机的最大再生制动力满足后轴所需要总制动力时,后轴只有电机再生制动力制动;反之,后轴的再生制动力为后轴两个轮毂电机的最大再生制动力,不足部分由机械制动力补充。其中,分配到前、后轴的再生制动力还需平均分配到左右车轮的两个轮毂电机。在紧急制动工况下,即当制动强度 $z > 0.7$ 时,电机再生制动力不再参与制动,只采用机械制动。

2.3 轮毂电机再生制动力修正策略

(1) 电池最大充电功率产生的修正。4 个轮毂电机总的最大再生制动力矩与轮毂电机本身的特性和电池的最大充电功率有关,为了最大限度发挥电机再生制动的潜力,同时简化控制逻辑,在初步分配制动力时,电机的最大再生制动力由电机本身的特性决定,然后引入电池的最大充电功率限制产生的修正系数 K_1 对制动力的分配结果进行修正,其定义为:

$$K_1 = \begin{cases} 1, & T_{ren} \leq T_{bat_max} \\ \frac{T_{bat_max}}{T_{ren}}, & T_{ren} > T_{bat_max} \end{cases} \quad (11)$$

式中: T_{ren} — 初步分配的 4 个轮毂电机再生制动力矩之和; T_{bat_max} — 电池的最大充电功率所限制的再生制动力矩, $N \cdot m$ 。

修正系数 K_1 能确保 4 个轮毂电机在制动时总的发电功率不会超过电池的最大充电功率,从而避免对电池造成损害;

(2) 电池 SOC 值产生的修正。当电池的 SOC 值过高时,电机不应再参与制动过程,因此引入电池 SOC 值产生的修正系数 K_2 ,其定义为^[12]:

$$K_2 = \begin{cases} 1, & SOC \leq 0.95 \\ 0, & SOC > 0.95 \end{cases} \quad (12)$$

(3) 车速产生的修正。当车速较低时,轮毂电机产生的制动电流很小,往往不能克服自身的消耗而给电池充电,此时电机的发电效率低,可回收的再生制动能量非常有限。另外,为了避免低转速时电机再生制动运行不稳定所造成的制动冲击,当车速较低时,不应进行再生制动^[14]。当车速低于 5 km/h 时,不再进行电机再生制动。当车速在 5 km/h ~ 10 km/h 之间时,电机再生制动力逐渐退出制动过程。

综上所述,引入车速产生的修正 K_3 ,其定义为:

$$K_3 = \begin{cases} 0, & u \leq 5 \text{ km/h} \\ 0.2u - 1, & 5 \text{ km/h} < u < 10 \text{ km/h} \\ 1, & u \geq 10 \text{ km/h} \end{cases} \quad (13)$$

建立再生制动力修正系数计算模块如图 5 所示。

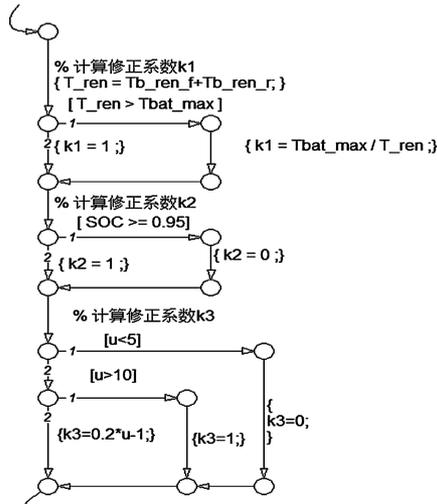


图 5 修正系数的计算

(4) 修正后的制动力分配。修正后的制动力分配满足:

$$\begin{aligned} F_{\mu 1_ren_rev} &= K_1 K_2 K_3 F_{\mu 1_ren} \\ F_{\mu 2_ren_rev} &= K_1 K_2 K_3 F_{\mu 2_ren} \\ F_{\mu 1_fric_rev} &= F_{\mu 1} - F_{\mu 1_ren_rev} \\ F_{\mu 2_fric_rev} &= F_{\mu 2} - F_{\mu 2_ren_rev} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $F_{\mu 1_ren_rev}$, $F_{\mu 2_ren_rev}$ — 整车修正后的前、后轴电机再生制动力; $F_{\mu 1_fric_rev}$, $F_{\mu 2_fric_rev}$ — 整车修正后的前、后轴机械制动力。

3 再生制动仿真验证及结果分析

基于设计的再生制动力分配策略,本研究在 Matlab/

Simulink 中建立仿真模型,如图 6 所示。

整个模型由再生制动力分配策略模块、整车动力学模块、机械制动系统响应模块、电机模块、电池模块组成。

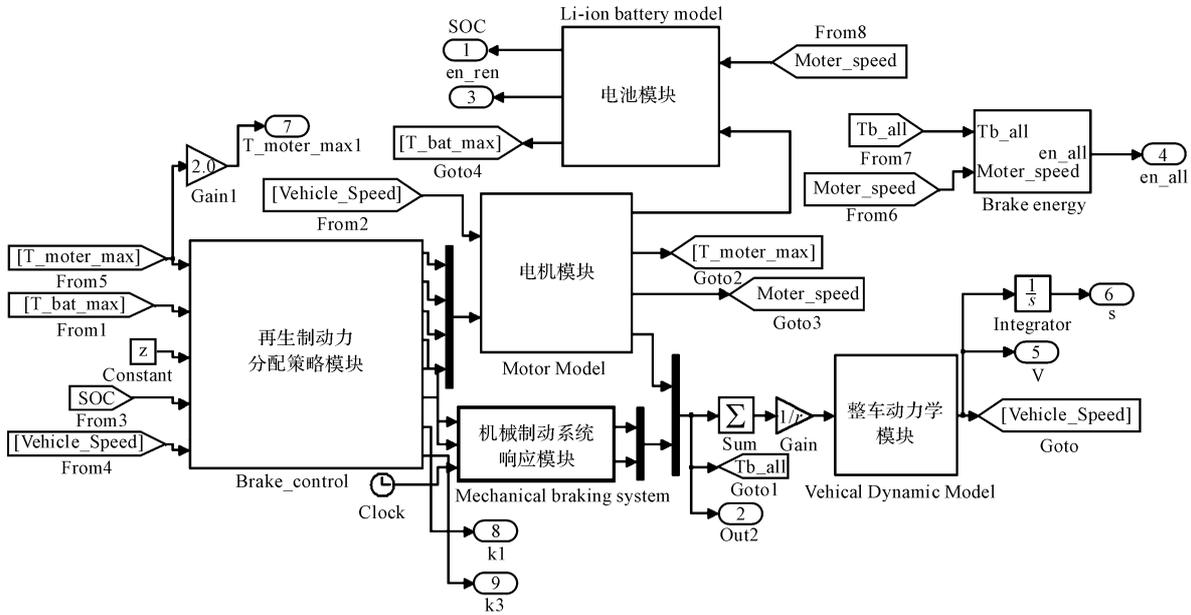


图 6 再生制动仿真模型

本研究选用制动能量回收率作为能量回收效果的评价指标^[15]。制动能量回收率 n_{reg} 定义为再生制动的过程中,电池回收的能量 E_{bat} 和制动过程中车辆总动能 E_u 的比值,即:

$$\eta_{reg} = \frac{E_{bat}}{E_u} \quad (15)$$

电池回收的能量通过制动过程中电池的充电电压 U_{bat} 和充电电流 I_{bat} 计算得到:

$$E_{bat} = \int U_{bat} I_{bat} dt \quad (16)$$

车辆总动能由总质量 m 和制动前一刻的车速 u 计算得到:

$$E_u = \frac{1}{2} mu^2 \quad (17)$$

3.1 初始车速 30 km/h

初始车速为 30 km/h,制动强度分别为 0.1、0.2、0.4 和 0.75 时,固定比例制动力分配策略和理想制动力分配策略下的制动能量回收率如表 1 所示。

表 1 30 km/h 的初始车速

制动强度	固定比例分配策略下的制动能量回收率/(%)	理想制动力分配策略下的制动能量回收率/(%)
0.1	67.8	67.8
0.2	41.1	51.2
0.4	21.5	26.7
0.75	0	0

3.2 初始车速 70 km/h

初始车速为 70 km/h,制动强度分别为 0.1、0.2、0.4 和 0.75 时,两种再生制动力分配策略下的制动能量回收率如表 2 所示。

表 2 70 km/h 的初始车速

制动强度	固定比例分配策略下的制动能量回收率/(%)	理想制动力分配策略下的制动能量回收率/(%)
0.1	51.5	51.5
0.2	28.9	30.8
0.4	15.1	16.1
0.75	0	0

两种分配策略下的仿真结果如图 7、图 8 所示。

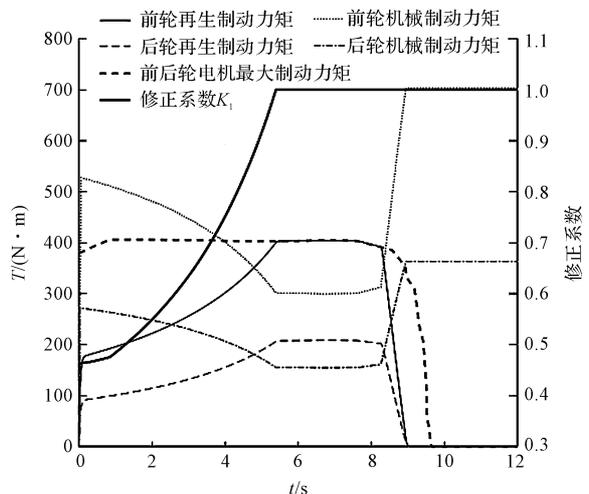


图 7 固定比例分配策略下的仿真结果

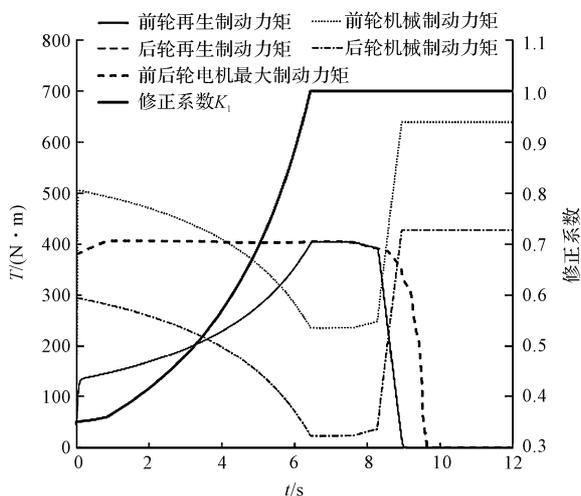


图 8 理想制动力分配策略下的仿真结果

制动初期,固定比例分配策略下 4 个电机实际可以产生的再生制动力矩约为电池最大充电容许值的 2.2 倍,理想制动力分配策略下 4 个电机实际可以产生的再生制动力矩约为电池最大充电容许值的 2.9 倍。但是,由于加入了修正系数 K_1 ,在制动初期两种控制策略的再生制动力矩相等。电池充电能力严重限制了轮毂电机再生制动能力的发挥,因此理想制动力分配策略的制动能量回收效率只是略大于固定比例分配策略。

4 结束语

本研究针对四轮驱动电动汽车,设计了固定比例制动力分配策略和理想制动力分配策略。通过搭建的再生制动系统模型验证了两种制动控制策略的有效性。仿真结果表明:当制动强度较小时,理想力分配策略的能量回收效率基本上和固定比例分配策略相同。其次,在城市道路行驶工况、中度制动强度下,理想制动力分配策略的制动能量回收效率明显优于固定比例分配策略。最后,当初始车速较大,制动强度较大时,由于电池的充电能力限制了理想制动分配策略制动能量回收效率进一步的提高,此时理想制动力分配策略的制动能量回收效率只是略高于固定比例分配策略。

参考文献 (References):

[1] 宋永华,阳岳希,胡泽春. 电动汽车池的现状与发展趋势[J]. 电网技术,2011,35(4):1-7.

- [2] 何明前,胡晓敏,范世军. 基于 LTC4000 的锂电池充电模块[J]. 兵工自动化,2015,34(1):76-78.
- [3] 谭伟,李新宏,李耀昌. 软包锂电池自动真空注液系统研究[J]. 机电工程技术,2017,46(8):61-63.
- [4] ZHANG Xue-qiang, HOU Zhi-guo, LI Xiao-na, et al. Na-birnessite with high capacity and long cycle life for rechargeable aqueous sodium-ion battery cathode electrodes [J]. **Journal of Materials Chemistry A**,2016,4(3):856-860.
- [5] 仇斌,陈全世,张开斌. 北京市区电动轻型客车制能量回收潜力[J]. 机械工程学报,2005,41(12):87-91.
- [6] GAO Y, CHEN L, EHSANI M. Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV[J]. **SAE transactions**,1999,108(6):3184-3190.
- [7] GAO Y, EHSANI M. Electronic braking system of EV and HEV-Integration of regenerative braking, automatic braking force control and ABS[J]. **SAE 2001 Transactions Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems**, 2001(110):7.
- [8] GAO H, GAO Y, EHSANI M. A neural network based SRM drive control strategy for regenerative braking in EV and HEV[C]. **IEEE International Electric Machines & Drives Conference**. Cambridge: IEEE,2001.
- [9] PANAGIOTIDIS M, DELAGRAMMATIKAS G, ASSANIS DN. Development and use of a regenerative braking model for a parallel hybrid electric vehicle[J]. **SAE 2000 Transactions Journal of Engines**,2000(109):3.
- [10] HSIAO M H, LIN C H. Antilock braking control of electric vehicles with electric brake[C]. **SAE World Congress & Exhibition**, Warrendale: SAE,2005.
- [11] HOON Y, DONGHYUN K, SUNGHO H, et al. Regenerative braking algorithm for a HEV with CVT ratio control during deceleration [J]. **Journal of Automobile Engineering**,2006,220(11):1589-1600.
- [12] 田超贺. 轮毂电机驱动电动汽车再生制动控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学机械与电子控制工程学院,2012.
- [13] YAMATO M. Ech-vehicle assessment system (Eco-VAS): acomprehensive environmental impact assessment system for the entire development process[J]. **Toyota Technical Review**,2005,51(1):80-85.
- [14] 刘阳. 轮毂电动汽车机电复合再生制动控制策略的研究[D]. 沈阳:河南科技大学机械工程学院,2015.
- [15] ZHANG Jun-zhi, LV Chen, GOU Jin-fang, et al. Cooperative control of regenerative braking and hydraulic braking of an electrified passenger car[J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering**,2012,226(10):1289-1302.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

谢博臻,宋绍鹏,李俊杰,等. 四驱电动汽车再生制动力控制策略研究[J]. 机电工程,2017,35(1):83-88.

XIE Bo-zhen, ZHU Shao-peng, LI Jun-jie, et al. Control strategy on regenerative braking force of four-wheel-drive electric vehicle[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017,35(1):83-88.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn